

УДК 621.891.2

**ВЫБОР СОСТАВА ПРИРАБОТОЧНОЙ КОМПОЗИЦИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СТАЛЬНЫХ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

д-р техн. наук, доц. В.И. ЖОРНИК; д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск);

А.П. ЯЛОВИК

(ОАО «Нефтезаводмонтаж», Новополоцк);

канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН

(Полоцкий государственный университет)

Анализируются существующие методы триботехнической обработки поверхностей трения деталей машин. Показано, что трибомеханическая обработка в присутствии прирабочной композиции, содержащей наноразмерные твердые добавки, относится к числу эффективных методов повышения работоспособности узлов трения. Установлено, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования газотермических стальных покрытий с высоким содержанием остаточного аустенита наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы 1-й или 2-й категории пенетрации по классификации NLGI. Определено необходимое содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в пластичной смазке. Установлены пределы размера наночастиц в процесс приработки, удельная нагрузка, скорости скольжения, зависимость продолжительности трибомеханической обработки от пути трения.

Ключевые слова: триботехнология, трибомеханическая обработка, прирабочная композиция, твердые наноразмерные добавки, стальные газотермические покрытия.

Введение. Триботехнология – это направление в трибологии, предметом исследования и разработки которой являются технологические методы управления трибологическими характеристиками (трение, износостойкость) трибосопряжений. Триботехнология является новой перспективной технологической отраслью, направленной на повышение триботехнических свойств поверхностей трения и увеличение ресурса работы трибосопряжений. В основу триботехнологии положен принцип преобразования разрушительного действия силы трения в созидательный процесс упрочнения и восстановления поверхностей трения, принцип управления процессами физико-химических превращений, происходящих на поверхности трения под термомеханическим воздействием при фрикционном контакте. Её цель – формирование в поверхностном слое структур с пониженной энергией сдвига либо повышенным сопротивлением зарождению усталостных трещин, а также восстановление изношенного поверхностного слоя.

Современная триботехнология располагает большим числом технологических методов, используемых в течение многих десятилетий или разработанных в последние 10–15 лет. Триботехнология включает в себя формирование покрытий наплавкой трением, при которой расплавление материала наносимого покрытия осуществляется за счет тепла, выделяющегося при трении присадочного материала о наплавляемую поверхность детали [1–4].

К числу наиболее известных явлений, используемых в триботехнологии, относится избирательный перенос. Избирательный перенос при трении, или так называемый «эффект безызносности», реализуется в результате протекания на поверхности контактирующих тел химических и физических процессов, приводящих к образованию самоорганизующихся систем автокомпенсации износа и снижения коэффициента трения [5; 6]. На принципах избирательного переноса основываются способы финишной антифрикционной безабразивной обработки поверхностей трения, при которых натиранием на обрабатываемую поверхность наносится тонкий слой пластичного материала, обладающего повышенными антифрикционными свойствами [7; 8].

Известен широкий класс металлоплакирующих смазочных материалов, содержащих в своем составе ультрадисперсные порошки мягких металлов или их химические соединения. Принцип действия этих смазочных материалов состоит в формировании на участках фактического контакта защитных пленок, которые, локализуя в себе сдвиговые деформации при трении, уменьшают силовое взаимодействие и интенсивность изнашивания сопряженных поверхностей [9; 10]. Составной частью триботехнологии также являются способы восстановления поверхностей трения в режиме непрерывающейся эксплуатации с применением добавок к смазочным материалам, содержащих дисперсные природные слоистые силикаты. Применение подобных добавок способно обеспечить восстановление изношенных поверхностей с формированием на поверхностях трения металлокерамических покрытий, имеющих повышенную износостойкость [11; 12].

К триботехнологии следует также отнести технологические приемы повышения триботехнических свойств пар трения и увеличения ресурса трибосопряжений путем их приработки в присутствии смазочного материала, содержащего наноразмерные твердые компоненты, в частности наноразмерные алмазы, получившие название трибомеханического модифицирования [13–15]. Твердые наноразмерные частицы, введенные в состав смазочной среды, оказывают комплексное воздействие на трибосистему, увеличивая ее долговечность. С одной стороны, наночастицы повышают физические и объемно-механические свойства смазочного материала, увеличивают несущую способность смазочного слоя; с другой – твердые наноразмерные частицы способны оказать положительное влияние на поверхность контактирующих тел, изменив их структуру в процессе фрикционного контакта. Применение смазочных материалов, модифицированных, твердыми наноразмерными добавками, обеспечивает интенсификацию приработочных процессов в трибосопряжениях, расширение диапазона температурно-нагрузочных режимов эксплуатации узлов трения и повышение их ресурса. Эффективность трибомеханического модифицирования в значительной степени определяется структурно-фазовым состоянием поверхностного слоя материалов пары трения, составом приработочной композиции и нагрузочно-скоростными режимами трибоконтактного взаимодействия пары трения. Выбор состава смазочного материала для трибомеханической обработки композиционных стальных газотермических покрытий и является целью данной работы.

Материалы и методы исследований. Триботехнические испытания проводились на трибометре МТВП-9М, оснащенном устройством для измерения коэффициента трения и управляемом программным комплексом. Контртело – пластина из закаленной стали У8 твердостью 64...65 HRC (800 HV 30). Эффективность процесса трибомеханического модифицирования поверхности трения определялась на основе оценки характера изменения коэффициента трения в процессе приработки, уровня увеличения твердости прирабатываемой поверхности и продолжительности процесса приработки. Поверхность покрытия после газотермического напыления подвергалась механической обработке (шлифованию) до получения шероховатости поверхности, соответствующей параметру шероховатости $Ra = 0,63...0,80$ мкм.

Отработка состава приработочной композиции и режимов трибомеханического модифицирования осуществлялась на композиционных стальных газотермических покрытиях, полученных распылением следующих пар проволоочных материалов (табл. 1).

Таблица 1. – Варианты газотермических покрытий для отработки параметров трибомеханического модифицирования

№ образца	Марки напыляемых стальных проволок		Диаметр проволоки, мм		Соотношение диаметров проволок, D_1 / D_2	Содержание Остаточного аустенита, % об.
	проволока № 1	проволока № 2	D_1	D_2		
1	40X13	08X18H10T	1,8	1,6	1,12	46
2	45X14H14B2M	12X18H10T	1,8	1,6	1,12	52
3	90X18MФ	12X18H12T	1,8	1,5	1,20	60
4	95X18	12X18H10T	1,8	1,5	1,20	58
5	110X18M	12X25H16T7	1,8	1,5	1,20	60

Композиционные газотермические покрытия, полученные одновременным распылением стальных проволок аустенитного и мартенситного классов, характеризуются наличием метастабильной структуры с большим содержанием остаточного аустенита (46...60 об.%), который на начальной стадии эксплуатации по механизму деформационно-активируемого $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения способен трансформироваться в упрочняющий покрытие мартенсит деформации [16]. Наряду с этим трибомеханическое модифицирование сопровождается формированием в поверхностных слоях ячеистой субзеренной структуры, характеризующейся повышенной износостойкостью [15].

Отработка состава смазочного материала и режимов приработки осуществлялась на основе анализа процессов трибологического контактирования элементов узлов трения в присутствии модифицированных пластичных смазок, оценки особенностей взаимодействий наночастиц добавки с волокнами дисперсной фазы пластичных смазок и экспериментальных данных по исследованию свойств (твердость, коэффициент трения) поверхностных слоев газотермических стальных покрытий после приработки поверхности трения.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Эксплуатационные характеристики смазочных материалов в значительной степени определяются их вязкостными показателями. Для пластичных смазок этот показатель может быть охарактеризован пенетрацией как физико-химическое свойство пластичных смазок, которое показывает степень густоты, консистенцию смазки.

В сфере разработки, производства и применения пластичных смазок принята их классификация по консистенции, предложенная Американским национальным институтом пластичных смазок (National Lubricating Grease Institute (NLGI)), в которой консистенция пластичной смазки характеризуется числом

пенетрации, что является мерой погружения конуса стандартной массы в пластично-вязкую среду за определенное время при определенной температуре.

Количественно пенетрация определяется согласно ГОСТ 5346-78 или ASTM D 217. Определение консистенции смазки в соответствии с этими методиками осуществляется с помощью пенетрометра, имеющего специальный конус, который опускают на 5 секунд в смазку при температуре 25 °С; глубина погружения конуса измеряется и выражается в десятых долях миллиметра.

Существует девять категорий консистенции пластичных смазок по классификации NLGI (табл. 2):

- категории 000 и 00 представляют собой жидкие смазки, использующиеся в качестве альтернативы маслам в механизмах и централизованных системах смазки с малым сечением подающих каналов (например, в двигателях грузовых автомобилей), закрытых зубчатых передачах;
- категории 0 и 1 имеют полужидкую или очень мягкую консистенцию и применяются в централизованных системах смазки (например, промышленное оборудование, грузовые автомобили);
- категории 2 и 3 мягкой и полумягкой консистенции используются в основном для смазывания подшипников (категория 2 наиболее распространена среди пластичных смазок для легкового транспорта);
- категории 4 и 6 представляют исключительно густые смазки и используются, например, в тяжело-нагруженных открытых зубчатых передачах.

Таблица 2. – Классификация пластичных смазочных материалов по их консистенции

Категория NLGI	Число пенетрации P (0,1 мм)	Консистенция
000	445...475	Очень жидкая
00	400...430	Жидкая
0	355...385	Полужидкая
1	310...340	Очень мягкая
2	265...295	Мягкая
3	220...250	Полутвердая
4	175...205	Твердая
5	130...160	Очень твердая
6	85...115	Особо твердая

Как указывалось выше, повышение триботехнических свойств поверхностей трения за счет реализации эффекта трибомеханического модифицирования достаточно эффективно протекает в присутствии пластичных смазочных материалов, содержащих наноразмерные алмазосодержащие добавки. Анализ взаимосвязи между консистенцией пластичной смазки и седиментационной устойчивостью образующейся композиции при введении в смазку наноразмерной добавки показывает, что в пластичных смазках с числом пенетрации выше $P = 340$, представляющих собой смазочные материалы полужидкой ($P = 355...385$), жидкой ($P = 400...430$) и очень жидкой ($P = 445...475$) консистенции, твердые наноразмерные добавки легко агрегируются в субмикро- и микроразмерные образования, обуславливающие низкую седиментационную устойчивость смазочной композиции. Использование смазочных композиций этого класса пенетрации с модифицирующими алмазосодержащими добавками в качестве приработочных составов является неэффективным ввиду чрезмерного абразивного действия образующихся алмазосодержащих агрегатов. Причем смазки этого класса рекомендуются только для обслуживания узлов трения с хорошими уплотнительными устройствами, что сужает область применения предлагаемого технического решения.

Пластичные смазочные материалы с числом пенетрации ниже $P = 265$ (полутвердая консистенция – $P = 220...250$; твердая – $P = 175...205$, очень твердая – $P = 130...160$ и особо твердая – $P = 85...105$) рекомендуются в основном для применения в низкоскоростных или неподвижных соединениях, поскольку они в силу высокой вязкости плохо подтекают в зону трибоконтакта, при их использовании в узлах трения возможен разрыв смазочной пленки и могут появляться задиры на поверхности трения. Вследствие высокой вязкости смазок при введении в них наноразмерных добавок, в том числе и наночастиц алмазно-графитовой шихты, практически невозможно добиться гомогенности состава получаемой смазочной композиции. При этом в ней остаются крупные агрегаты наночастиц, оказывающие отрицательное влияние на поверхность трения по абразивному механизму изнашивания.

Приведенный выше анализ показывает, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы с числом пенетрации $P = 265...340$, что соответствует очень мягкой и мягкой консистенции.

Наноразмерные частицы добавки благодаря их высокой поверхностной энергии склонны к агрегированию, и для повышения эффективности их применения требуется проводить операции диспергирования агрегатов наночастиц. Для этих целей используют диспергирующие устройства, в основу функционирования которых положены эффекты акустической или гидродинамической кавитации. Как правило, использование подобных устройств эффективно для достижения дисперсности частиц не ниже $d_q = 10$ нм.

В противном случае резко возрастает продолжительность обработки, требуются дополнительные операции по стабилизации гранулометрического состава диспергируемого материала, что снижает экономическую целесообразность операции диспергирования. В случае применения наночастиц алмазно-графитовой шихты размером более $d_q = 50$ нм невозможно получить нанокпозиционную пластичную смазку с бинарной дисперсной фазой, в которой наночастицы добавки были бы закреплены (стабилизированы) в волокнах солей высокомолекулярных кислот, что предопределяет увеличенный ресурс, высокие противозадирные и противоизносные свойства, а также эффективное трибомеханическое воздействие на поверхности трения используемого смазочного материала.

Диапазон оптимальных значений концентрации наноразмерной алмазно-графитовой добавки и режимов приработки (удельная нагрузка, скорость скольжения, продолжительность) в присутствии нанокпозиционной смазки определялись на основе экспериментальных исследований.

На рисунке 1 представлена зависимость коэффициента трения от продолжительности приработки (путь трения) для газотермического покрытия состава № 1 (см. табл. 1) при скорости скольжения $V_{ск} = 0,25$ м/с и удельных нагрузках $P = 40$ МПа (кривые 1а, 1б, 1в, 1г) и $P = 50$ МПа (кривые 2а, 2б, 2в, 2г) с использованием пластичной смазки Литол-24 (число пенетрации 300), модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А согласно ТУ РБ 1000561180.003-2003 (размер частиц в пределах $d_q = 10...50$ нм) с различной концентрацией добавки: $C_{ША-А} = 0,20$ мас. % (кривые 1а, 2а); $C_{ША-А} = 0,25$ мас. % (кривые 1б, 2б); $C_{ША-А} = 0,50$ мас. % (кривые 1в, 2в); $C_{ША-А} = 0,60$ мас. % (кривые 1г, 2г).

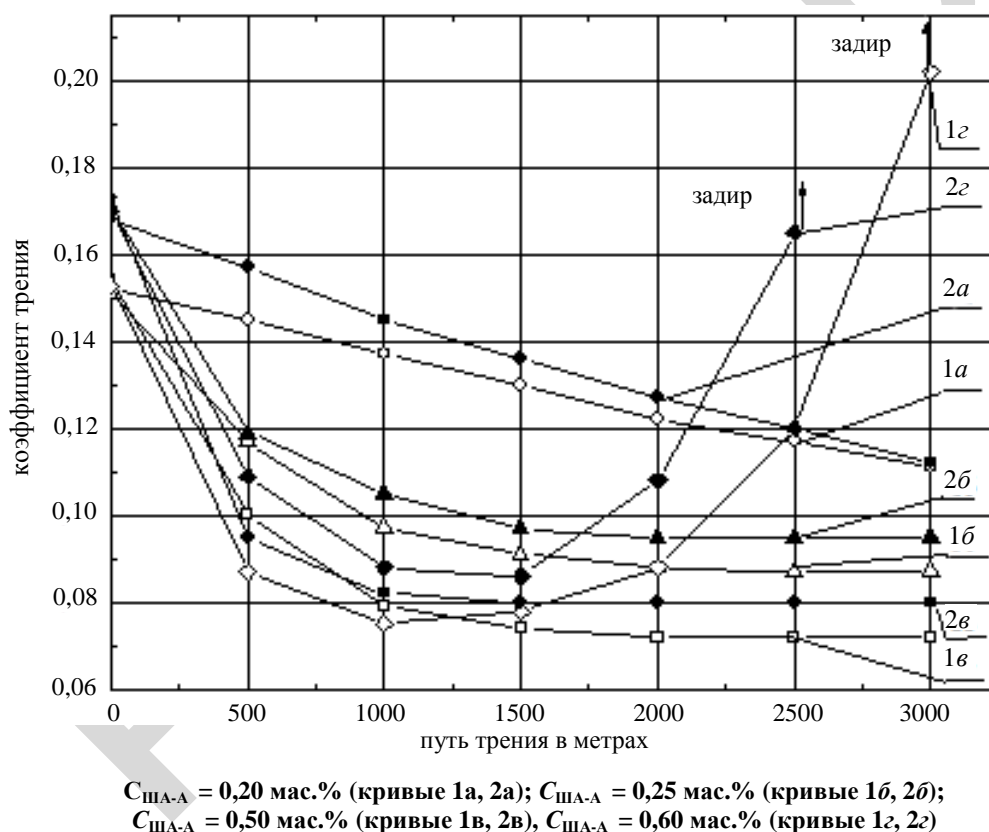


Рисунок 1. – Изменение коэффициента трения газотермического покрытия в процессе приработки в присутствии пластичной смазки Литол-24, модифицированной алмазно-графитовой шихтой ША-А (размер частиц в пределах $d_q = 10...50$ нм) с различной концентрацией добавки

Анализ приведенных данных показывает, что в случае использования приработочного состава с концентрацией алмазно-графитовой шихты в пределах $C_{ША-А} = 0,25...0,50$ мас. % (кривые 1б, 1в, 2б, 2в) процесс приработки протекает достаточно интенсивно, и уже после пути трения $L = 1000...1500$ м наступает стабилизация коэффициента трения. При использовании приработочной композиции с концентрацией алмазно-графитовой шихты $C_{ША-А} < 0,25$ мас. % (кривые 1а, 2а) продолжительность процесса приработки рабочей поверхности газотермического покрытия чрезвычайно велика, о чем можно судить по тому, что стабилизация коэффициента трения не наступает даже после пути трения $L = 3000$ м. Это обусловлено недостаточным содержанием в приработочном составе сверхтвердых частиц, обеспечивающих проявление эффекта трибомеханического модифицирования поверхности трения.

При концентрации алмазно-графитовой шихты в смазке $C_{\text{ША-А}} > 0,50$ мас. % (кривые 1г, 2г) на начальной стадии происходит резкое снижение коэффициента трения, однако через некоторое время наблюдается столь же резкое его увеличение с последующим наступлением задира. Это, вероятно, связано с чрезмерно повышенной вязкостью смазочной композиции при таком содержании в ней модификатора, ухудшением подтекания смазочного состава в зону трибоконтакта и нарушением условий смазывания пары трения. Наряду с этим повышенное содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции приводит к существенному увеличению стоимости последней.

В таблице 3 представлены результаты исследований влияния режимов трибомеханического модифицирования на характер изменения свойств поверхности газотермического покрытия (твердость, коэффициент трения), а также на продолжительность резкой эволюции свойств поверхностного слоя покрытия (по пути трения). Эксперименты проводились на образцах покрытий, материал которых соответствовал нумерации, приведенной в таблице 1; концентрация алмазно-графитовой шихты в смазочной композиции составляла $C_{\text{ША-А}} = 0,40$ мас. %; удельная нагрузка в зоне трибоконтакта $p = 30 \dots 60$ МПа; скорость скольжения $V_{\text{ск}} = 0,15 \dots 0,35$ м/с.

Таблица 3. – Влияние режимов трибомодифицирования на свойства газотермических покрытий и продолжительность приработки (маркировка образцов соответствует таблице 1)

№ опыта	№ образца	Режимы трибомодифицирования		Параметры эффективности трибомодифицирования			Примечание
		давление p , МПа	скорость $V_{\text{ск}}$, м/с	твердость HV , МПа, начал./конеч.	коэффициент трения f , начал./конеч.	путь трения L , м	
1	1	30	0,30	3300/3700	0,16/0,12	3050	
2		40	0,30	3300/5500	0,16/0,07	1850	
3		50	0,30	3300/5600	0,17/0,08	1580	
4		60	0,30	3300/–	0,20/–	–	задир
5		50	0,15	3300/4450	0,17/0,10	2540	
6		50	0,20	3300/5550	0,17/0,07	1620	
7		50	0,35	3300/–	0,18/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ*
8	2	30	0,30	3650/4500	0,16/0,10	3100	
9		40	0,30	3650/5700	0,16/0,08	1780	
10		50	0,30	3650/5800	0,17/0,08	1610	
11		60	0,30	3650/–	0,21/–	–	задир
12		50	0,15	3650/4700	0,17/0,11	2510	
13		50	0,20	3650/5750	0,17/0,08	1670	
14		50	0,35	3650/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
15	3	30	0,30	4050/4950	0,16/0,10	3180	
16		40	0,30	4050/5900	0,16/0,08	1720	
17		50	0,30	4050/6200	0,17/0,07	1580	
18		60	0,30	4050/–	0,22/–	–	задир
19		50	0,15	4050/5550	0,17/0,11	2620	
20		50	0,20	4050/6150	0,18/0,09	1640	
21		50	0,35	4050/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
22	4	30	0,30	4200/5050	0,16/0,11	3380	
23		40	0,30	4200/6200	0,16/0,08	1800	
24		50	0,30	4200/6400	0,17/0,09	1620	
25		60	0,30	4200/–	0,23/–	–	задир
26		50	0,15	4200/5750	0,17/0,09	2850	
27		50	0,20	4200/6150	0,18/0,08	1680	
28		50	0,35	4200/–	0,20/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ
29	5	30	0,30	4600/5650	0,16/0,10	3500	
30		40	0,30	4600/6500	0,16/0,07	1860	
31		50	0,30	4600/6850	0,17/0,08	1660	
32		60	0,30	4600/–	0,22/–	–	задир
33		50	0,15	4600/5950	0,17/0,10	3100	
34		50	0,20	4600/6700	0,17/0,009	1720	
35		50	0,35	4600/–	0,19/–	–	задир, разрушение ДФ ПСМ

* ДФ ПСМ – дисперсная фаза пластичного смазочного материала.

Анализ данных, приведенных в таблице 3, показывает, что наиболее эффективно процесс трибомодифицирования поверхности трения для исследованных газотермических покрытий проявляется в диапазоне удельных нагрузок $p = 40...50$ МПа при скорости скольжения $V_{ск} = 0,20...0,30$ м/с. При этих режимах стабилизация коэффициента трения на уровне $f = 0,07...0,09$ наступает после приработки на пути трения $L = 1580...1860$ м, а твердость поверхностного слоя при этом увеличивается на 50...70%. При давлениях $p < 40$ МПа стадия приработки протекает на пути трения $L > 3000$ м, при этом повышение твердости поверхности составляет не более 12...23%, а коэффициент трения стабилизируется на уровне $f = 0,10...0,12$. При давлениях $p > 50$ МПа уже на стадии приработки начинают проявляться явления задира, обусловленные выдавливанием смазочного материала из зоны трения.

Скорость скольжения в меньшей степени, чем удельная нагрузка, оказывает влияние на протекание процессов модифицирования поверхности. Однако при значениях скорости скольжения $V_{ск} < 0,20$ м/с отмечено замедленное протекание процессов приработки поверхности трения, которые завершаются после пути трения $L > 2500$ м с фиксацией коэффициента трения на уровне $f = 0,09...0,11$ и повышением твердости поверхности покрытия на 28...37%. В случае проведения приработки при скорости скольжения $V_{ск} > 0,30$ м/с наблюдаются процессы разрушения дисперсной фазы пластичного смазочного материала и вытекания последнего из зоны трибоконтакта с последующим появлением задириков на поверхностях трения.

Таким образом, технология восстановления изношенных штоков должна включать процесс гиперзвуковой металлизации двумя проволоками. В качестве материала одной из проволок необходимо использовать высокохромистую сталь аустенитного класса с содержанием никеля не менее $C_{Ni} = 10\%$, в качестве другой проволоки использовать высокохромистую сталь мартенситного класса с содержанием углерода $C_C > 0,4\%$, причем ее диаметр в 1,12...1,20 раза больше диаметра проволоки аустенитного класса. После механической обработки необходимо осуществлять процесс приработки в смазочном материале, в качестве которого использовать пластичную смазку с числом пенетрации от $\Pi = 265$ до $\Pi = 340$, с содержанием алмазно-графитовой шихты $C_{ША-А} = 0,25...0,50$ мас.%, имеющей размер частиц в пределах $d_q = 10...50$ нм. Процесс приработки необходимо осуществлять при удельной нагрузке $p = 40...50$ МПа и скорости скольжения $V_{ск} = 0,20...0,30$ м/с.

Заключение. Анализ существующих методов триботехнической обработки поверхностей трения деталей машин показал, что трибомеханическая обработка в присутствии прирабочной композиции, содержащей наноразмерные твердые добавки, относится к числу эффективных методов повышения работоспособности узлов трения. Исследование взаимосвязи между консистенцией пластичной смазки и седиментационной устойчивостью образующейся композиции при введении в смазку наноразмерной добавки показывает, что для реализации эффекта трибомеханического модифицирования наиболее рационально использовать пластичные смазочные материалы 1 или 2-й категории пенетрации по классификации NLGI (с числом пенетрации от $\Pi = 265$ до $\Pi = 340$), что соответствует очень мягкой и мягкой консистенции. При этом содержание наноразмерной алмазно-графитовой шихты в пластичной смазке должно быть в пределах $C_{ША-А} = 0,25...0,50$ мас.%, а размер наночастиц должен находиться в пределах $d_q = 10...50$ нм. Для того чтобы реализовать протекание бездиффузионного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения с формированием в поверхностных слоях покрытия мартенсита деформации из образовавшегося в процессе напыления остаточного аустенита под влиянием деформационного воздействия при трибоконтакте и достигнуть минимального уровня коэффициента трения, необходимо осуществлять процесс приработки при удельной нагрузке $p = 40...50$ МПа и скорости скольжения $V_{ск} = 0,20...0,30$ м/с. При этом продолжительность трибомеханической обработки должна соответствовать пути трения $L = 2000...2200$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе [и др.] ; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Горленко, А.О. Триботехнология / А.О. Горленко, О.А. Горленко, А.С. Проскурин ; под ред. О.А. Горленко. – Брянск : БГТУ, 2006. – 188 с.
3. Кершенбаум, В.Я. Механотермическое формирование поверхностей трения. – М. : Машиностроение, 1987. – 232 с.
4. Zhornik, V.I. Tribomechanical Modification of Friction Surface by Running-In Lubricants with Nano-Sized Diamonds / V.I. Zhornik, V.A. Kukareko, M.A. Belotserkovsky // Advances in Mechanics Research. Vol. 1 ; Ed. : M. Jeremy Campbell. – New York : Nova Science Publishers, Inc., 2011. – P. 1–78.
5. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса ; под ред. Д.Н. Гаркунова. – М. : Машиностроение, 1977. – 215 с.
6. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н. Гаркунов. – М. : МСХА, 2001. – 616 с.

7. Польцер, Г. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Г. Польцер, А. Фирковский // Долговечность трущихся деталей машин. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 5. – С. 85–122.
8. Лукашок, А.Н. Двухслойное нанокристаллическое покрытие для прецизионных пар трения скольжения / А.Н. Лукашок, П.В. Тихонов // Перспективные материалы ; Интерконтакт Наука. – М., 2007. – С. 294–298.
9. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении / А.С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 4. – Ч. 2 : Ориентационная упорядоченность поддерживающего слоя при самоорганизации в гидродинамическом режиме трения. – С. 650–658.
10. Комаров, С.Н. Металлоплакирующие смазочные материалы для пар трения сталь – сталь / С.Н. Комаров, В.Ф. Пичугин // Долговечность трущихся деталей машин. – М. : Машиностроение, 1990. – Т. 5. – С. 70–85.
11. Кобыльсков, И.П. Комплексные решения вопросов энергосбережения и надежности при эксплуатации машин на основе РВС-технологии / И.П. Кобыльсков // Инновации в машиностроении : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. ОИМ НАН Беларуси, Минск, 30–31 окт. 2008 г. / ОИМ НАН Беларуси ; ред. кол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск : ОИМ НАН Беларуси, 2008. – С. 125–128.
12. Состав для формирования новообразованного слоя на трущихся металлических поверхностях : пат. 22669798470 RU / Ю.А. Червоненко. – Оpubл. 27.12.2005.
13. Витязь, П.А. Формирование износостойких поверхностных структур и механизм фрикционного разрушения при трении в среде смазочного материала, модифицированного ультрадисперсными алмазографитовыми добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукареко, А.И. Камко // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 1. – Ч. 1 : Триботехнические свойства. – С. 61–68.
14. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 527 с.
15. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П.А. Витязь [и др.]. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.
16. Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 10. – С. 39–44.

Поступила 18.01.2017

SELECTING THE COMPOSITION OF THE APPLICATION COMPOSITION AND DETERMINING THE REGIMES OF TRIBOMECHANICAL PROCESSING OF STEEL GAS-THERMAL COATINGS

V. ZHORNIK, M. BELOTSEKOVSKY, A. YALOVIK, A. DUDAN

The existing methods of tribotechnical treatment of friction surfaces of machine parts are analyzed. It has been shown that tribomechanical treatment in the presence of a run-in composition containing nano-sized solid additives is one of the most effective methods for improving the operability of friction units. It has been found that to realize the effect of tribomechanical modification of gas-thermal steel coatings with a high content of residual austenite, it is most rational to use plastic greases of the 1st or 2nd category of penetration according to the NLGI classification. The necessary content of nanoscale diamond-graphite charge in plastic grease is determined. The size limits of the nanoparticles in the process of run-in, the specific load, the sliding speed, the dependence of the duration of the tribomechanical treatment on the friction path are established.

Keywords: tribotechnology, tribomechanical treatment, running-in composition, solid nano-sized additives, steel gas-thermal coatings.